



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Off nlegungsschrift
10 DE 41 30 237 A 1

51 Int. Cl. 5:
G 01 B 11/02
G 01 B 11/24

21 Aktenzeichen: P 41 30 237.0
22 Anmeldetag: 11. 9. 91
43 Offenlegungstag: 18. 3. 93

DE 41 30 237 A 1

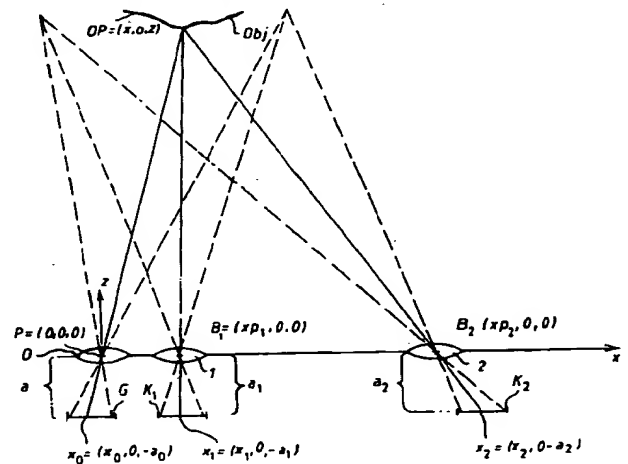
71 Anmelder:
Fa. Carl Zeiss, 7920 Heidenheim, DE

72 Erfinder:
Hof, Albrecht, Dr., 7080 Aalen, DE; Hanßen,
Adalbert, 7923 Königsbronn, DE

54 Verfahren und Vorrichtung zur dreidimensionalen optischen Vermessung von Objektoberflächen

57 Die Erfindung betrifft Verfahren und Vorrichtung zur dreidimensionalen optischen Vermessung von Objektoberflächen mittels auf die Objektoberfläche projizierter Streifenmuster. Die Meßvorrichtung besteht aus einem Streifenprojektor (O, G) und zwei Kameras, (1, k), (2, k₂), die in unterschiedlichen Abständen zum Projektor (O, G) angeordnet sind. In einem ersten Ausführungsbeispiel weichen die Abstände der beiden Kameras (1, k₁), (2, k₂) sehr stark von einander ab. In diesem Ausführungsbeispiel liefert die Auswertung der Streifenphase in den Bildern der entfernten Kamera innerhalb eines großen Meßbereiches eindeutige Meßwerte, während die Streifenphasen in den Bildern der näheren Kamera (1, k₁) hochgenaue Entfernungsmeßwerte liefert.

In einem zweiten Ausführungsbeispiel sind beide Kameras sehr nahe beieinander angeordnet. Die Auswertung der Streifenphasen in jedem Kamerabild liefert dann sehr genaue, mehrdeutige Objektkoordinaten. Durch Kombination der Kamerabilder im Auswerterechner werden dann innerhalb der Schwebungsperiode beider Streifenmuster eindeutige Objektkoordinaten berechnet. Die erfindungsgemäßen Meßverfahren und Meßvorrichtungen liefern somit innerhalb eines großen Eindeutigkeitsbereiches eindeutige Koordinatenmeßwerte, und ist insbesondere auch zur Vermessung un stetiger Objektoberflächen geeignet.



DE 41 30 237 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft Verfahren und Vorrichtung zur dreidimensionalen optischen Vermessung von Objekt-
 5 oberflächen, bei dem ein Projektor ein Streifenmuster auf die Objektoberfläche projiziert und dasselbe aufprojiz-
 ierte Streifenmuster mit zwei Videokameras aufgezeichnet wird und in einem den Videokameras nachgeschal-
 teten Auswerterechner die Objektoberfläche berechnet wird.

Ein derartiges Meßverfahren und eine zugehörige Meßvorrichtung sind aus dem Aufsatz in Optical Enginee-
 ring, Vol. 24 (1985), 966 bekannt. Es wird dabei ein Muster mit schmalen hellen Streifen auf großen dunklen
 10 Zwischenräumen auf das Meßobjekt projiziert. Das am Objekt deformierte Streifenmuster wird mit zwei
 Kameras aufgezeichnet und die Deformation der Helligkeitsstreifen ausgewertet. Die zweite Kamera soll
 vermeiden, daß zeitlich nacheinander Referenzkoordinaten und das Meßobjekt vermessen werden müssen.
 Damit keine Probleme bezüglich der Synchronisation der Kameraauslesung auftreten, bilden beide Kameras das
 Objekt auf dasselbe Kameratarget ab. Nachteilig ist hier, daß die Objektoberfläche nur entlang der hellen
 Streifen vermessen wird, zwischen den relativ breite Zwischenräume liegen, an denen keine Messung erfolgt.
 15 Zur vollständigen Erfassung der Topografie der Objektoberfläche müssen daher acht Messungen nacheinander
 mit verschobenen Mustern ausgeführt werden. Außerdem ist die relative Meßauflösung (Meßbereich/Meßauf-
 lösung) senkrecht zur Prüflingsoberfläche mit 50/1 relativ gering.

In der EP-OS-01 82 469 und der DE-OS-32 28 753 sind sogenannte Streifenprojektionsanordnungen beschrie-
 ben. Hier werden sinusförmige Helligkeitsmuster auf die Objektoberfläche projiziert und die Muster jeweils mit
 20 einer einzigen Kamera aufgezeichnet. Es werden zeitlich nacheinander drei oder vier Bilder aufgenommen,
 wobei das Muster zwischen den Aufnahmen der Bilder um ein Drittel oder ein Viertel der Streifenperiode
 verschoben wird. Die Auswertung der Streifenmuster erfolgt mit den aus der Phasenschiebeinterferometrie
 bekannten Algorithmen, mit denen die Streifenphase auf etwa $2^\circ\pi/100$ bestimmt werden kann. Nachteilig ist,
 daß die Phasenauswertung nur innerhalb einer Streifenordnung eindeutige Meßergebnisse liefert. Zur Lösung
 25 dieses Problems wird in der EP-OS-01 82 469 eine sogenannte Sprungstellenbeseitigung durchgeführt, die
 ebenfalls aus der Interferometrie bekannt ist. Die Sprungstellenbeseitigung setzt voraus, daß die Oberfläche
 stetig ist und ein Startpunkt bekannt ist. Bei verrauschten Meßwerten kann es leicht vorkommen, daß das
 Verfahren einen falschen Meßwert berechnet und dann weiter falsch anschließt, so daß großflächige Fehler im
 Meßergebnis auftreten. Das Verfahren versagt vollständig, wenn das Meßobjekt selbst unstetig ist.

Zur Vergrößerung des Eindeutigkeitsbereiches ist es aus der DE-OS-33 28 753 bekannt, zwei Streifenmuster
 zu projizieren, von denen eines die achtfache Periodenbreite des anderen Streifenmusters hat. Bei der Phasen-
 schiebung der Muster werden diese jedoch mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegt bzw. um unter-
 30 schiedliche Strecken senkrecht zur Streifenrichtung verschoben. Dadurch kann die relative Anordnung der
 Streifenmuster bezüglich des gerätefesten Koordinatensystems leicht verlorengehen.

Aus der EP-OS-00 76 866 ist es bekannt, gleichzeitig drei farblich kodierte, jeweils um 120 Grad gegenein-
 35 ander phasenverschobene Muster auf das Objekt zu projizieren. Die durch die Objektoberfläche deformierten
 Gittermuster werden entsprechend ihrer farblichen Kodierung von zugehörigen drei farbselektiven Kameras
 aufgezeichnet. Dadurch wird gleichzeitig das Muster bei drei verschiedenen Phasenlagen aufgenommen, so daß
 eine Auswertung nach den Phasenschiebealgorithmen erfolgen kann, ohne daß eine mechanische Verschiebung
 40 erforderlich ist. Eine Vergrößerung des Eindeutigkeitsbereiches wird durch die drei Kameras jedoch nicht
 erreicht.

Aus der DE-OS-38 13 692 ist eine Meßanordnung bekannt, bei der drei Projektor-Kamerasysteme im Winkel
 von 120 Grad zueinander um das Zentrum des Meßvolumens angeordnet sind. Jede Kamera nimmt ein Bild des
 45 Musters auf, das vom zugeordneten Projektor erzeugt wird. Die Verwendung von drei Projektor-Kamerasyste-
 men dient dazu, alle Oberflächen eines im Meßvolumen angeordneten Meßobjekts zu vermessen. Eine Vergrö-
 ßerung des Eindeutigkeitsbereiches in Richtung der optischen Achsen der Projektoren wird dadurch nicht
 erreicht.

Aus der US-PS-49 37 445 ist eine Vorrichtung bekannt, bei der ein Streifenmuster auf die Objektoberfläche
 50 projiziert wird und das Streifenmuster mit zwei CCD-Kameras aufgezeichnet wird. Beide CCD-Kameras sind im
 gleichen Abstand vom Projektionszentrum des Streifenprojektors angeordnet und nehmen jeweils Bilder ver-
 schiedener auf das Objekt projizierter Streifen auf. Die Verwendung zweier linearer Bildsensoren dient hier
 lediglich dazu, die Anzahl der auf jedem Bildsensor abgebildeten Streifen zu halbieren. Die Auswertung der
 Bildsensoren erfolgt analog zu der eingangs zitierten Literaturstelle, indem die seitliche Ablage der aufprojizier-
 ten Streifen gemessen wird. Streifenphasen werden hier nicht berechnet.

Aus der WO-91 09 273 ist des weiteren eine photogrammetrische Meßvorrichtung bekannt, bei der drei
 55 Kameras Bilder des Meßobjekts aufzeichnen und den Bildern des Meßobjekts gleichzeitig ein Referenzmuster
 überlagert ist. Hier wird jedoch kein Streifenmuster auf das Objekt projiziert und es werden ebenfalls keine
 Streifenphasen aus den Videobildern berechnet.

Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, Meßverfahren und Meßvorrichtungen der eingangs genannten
 60 Art anzugeben, die bei möglichst geringem gerätetechnischen Aufwand eine dreidimensionale Vermessung von
 Objektoberflächen bei hoher Tiefenauflösung und gleichzeitig großem Eindeutigkeitsbereich ermöglichen. Die
 Verfahren und Vorrichtungen sollen insbesondere auch die Vermessung unstetiger Objektoberflächen ermögli-
 chen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß aus den Kamerabildern jeder Kamera getrennt
 65 voneinander die Streifenphase der aufgezeichneten Muster berechnet wird und aus der Kombination der
 berechneten Streifenphasen beider Kameras Objektkoordinaten berechnet werden, die innerhalb eines großen
 Meßbereichs eindeutig sind. Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird somit nur ein einziger Streifenprojek-
 tor benötigt. Das auf die Objektoberfläche projizierte Streifenmuster wird gleichzeitig mit zwei Kameras aus

unterschiedlichen Richtungen relativ zur Projektionsrichtung aufgezeichnet. Das Meßvolumen liegt innerhalb des Bereichs, der gleichzeitig im Öffnungskegel des Projektors und den Öffnungskegeln beider Kameras liegt. Beide Kameras nehmen daher Bilder derselben Objektbereiche auf.

Die Berechnung der Streifenphasen der von jeder Kamera aufgezeichneten Streifenmuster kann mit den aus der Interferometrie bekannten Phasenschieberalgorithmen erfolgen. Es wird dann das Streifenmuster mehrfach nacheinander phasenverschoben auf die Meßoberfläche projiziert und jeweils mit beiden Kameras ein Bild des an der Objektoberfläche deformierten Streifenmusters aufgezeichnet. Es ist jedoch auch möglich, die Streifenphasen aus einzelnen Videobildern zu berechnen. Entsprechende Algorithmen sind beispielsweise aus Optical Engineering, Vol. 23, (1984), 391 bekannt bzw. in der älteren Anmeldung der Anmelderin mit dem Aktenzeichen P 40 14 0199 beschrieben.

Zur Kombination der Streifenphasen des mit getrennten Kameras aufgezeichneten Musters wird vorzugsweise wie folgt vorgegangen: zunächst wird ausgehend von der Streifenphase in einem Bildpunkt der ersten Kamera die Menge aller möglichen Lösungskoodinaten bestimmt. Diese Lösungskoodinaten sind diejenigen Punkte innerhalb des Meßvolumens, die die selbe Streifenphase, das heißt denselben Phasenrest, aber unterschiedliche Streifenordnungen haben. Diese Lösungskoodinaten liegen auf einer Geraden, die durch das Abbildungszentrum des Objektivs der ersten Kamera und der Position des Bildpunktes auf dem Kamerasensor bestimmt ist. Die Positionen dieser Lösungskoodinaten auf dieser Geraden sind durch den geometrischen Aufbau der zugehörigen Meßvorrichtung bestimmt. Im allgemeinen werden zu der berechneten Streifenphase mehrere Lösungskoodinaten gehören. Aus der relativen Anordnung beider Kameras zueinander und den Abbildungsweiten beider Kameras, insbesondere dem Abstand der Kamerasensoren von den Kameraobjektiven, wird zu jeder Lösungskoodinate ein zugehöriger Bildpunkt auf der zweiten Kamera bestimmt. Für den Fall, daß einer oder mehrere dieser Bildpunkte auf der zweiten Kamera nicht auf einem lichtempfindlichen Pixel des Kamerasensors liegt und damit für solche Bildpunkte noch keine Streifenphase berechnet ist, wird die zu diesem Bildpunkt gehörige Streifenphase durch Interpolation der in benachbarten Kamerapixeln gemessenen Phasenwerte berechnet. Bei dieser Interpolation ist es auch möglich, Ordnungssprünge der Streifenphasen zwischen benachbarten Kamerapixeln zu berücksichtigen. Zur weiteren Auswertung wird bevorzugt zu jedem zu den Lösungskoodinaten zugehörigen Bildpunkt auf der zweiten Kamera und der dort gemessenen bzw. interpolierten Streifenphase ein zweiter Satz von Lösungskoodinaten berechnet. Die Berechnung dieses zweiten Satzes von Lösungskoodinaten erfolgt analog zur Berechnung der ersten Lösungskoodinaten, jedoch anhand der Streifenphasen des mit der zweiten Kamera aufgezeichneten Streifenmusters. Aus diesen zwei Sätzen von Lösungskoodinaten wird dann dasjenige Koordinatenpaar ausgewählt, das den betragsmäßig kleinsten Abstand zueinander hat. Im Idealfall ist dieser Abstand Null, so daß beide ausgewählten Lösungskoodinaten die gesuchte Koordinate auf der Objektoberfläche darstellen. Sind die beiden ausgewählten Lösungskoodinaten ungleich, so beschreiben beide Lösungskoodinaten die Koordinate auf der Objektoberfläche innerhalb der erzielten Meßauflösung. Von dem ausgewählten Paar ist diejenige Lösungskoodinate der endgültige Meßwert, die von der Kamera stammt, deren Abstand quer zur Streifenrichtung des Projektors größer ist.

Bei einem besonders bevorzugten Ausführungsbeispiel wird dagegen auf die Berechnung des zweiten Satzes von Lösungskoodinaten verzichtet. Statt dessen werden die Differenzen der Streifenphasen in den zu den ersten Lösungskoodinaten zugehörigen Bildpunkten der zweiten Kamera und der Streifenphase im zugehörigen Bildpunkt der ersten Kamera berechnet und derjenige Bildpunkt der zweiten Kamera ausgewählt, für den die Differenz betragsmäßig minimal ist. Es wird dann die Koordinate der Objektoberfläche aus der einen ausgewählten Streifenphase berechnet.

Geeignete Vorrichtungen zu Durchführung des erfindungsgemäßen Meßverfahrens haben einen Streifenprojektor und mindestens zwei Videokameras, die dasselbe auf die Objektoberfläche projizierte Streifenmuster aufzeichnen und einen den Videokameras nachgeschalteten Auswerterechner. Das Objektiv der ersten Kamera ist dabei sehr nahe am Objektiv des Projektors angeordnet, während das Objektiv der zweiten Kamera relativ weit, vorzugsweise um ein Mehrfaches, von dem Objektiv des Projektors angeordnet ist. Der Abstand des ersten Kameraobjektivs kann so gewählt sein, daß für jeden Punkt im Meßvolumen die zugehörige, mit der Kamera aufgezeichnete Streifenphase innerhalb derselben Streifenordnung ist. Aus der Streifenphase und der bekannten festen Streifenordnung läßt sich dann die Objektkoodinate eindeutig, aber noch recht ungenau berechnen. Das zweite Kameraobjektiv ist in einem mehrfach größeren Abstand vom Projektor angeordnet. Maßgeblich sind immer die Abstände der objektseitigen Hauptpunkte der Objektive der Kameras und des Projektors. Die Streifenphase mit der zweiten Kamera stellt einen sehr genauen, jedoch mehrdeutigen Meßwert dar, dessen Ordnung durch den groben Meßwert mit der ersten Kamera eindeutig bestimmt ist.

Bei einem alternativen Ausführungsbeispiel sind beide Kameraobjektive so angeordnet, daß die Differenz der B-träge der Abstände zwischen ihnen klein ist im Verhältnis zu den Abständen zum Projektionsobjektiv, auch hier sind immer die Abstände zwischen den objektseitigen Hauptpunkten der Objektive gemeint, insbesondere können beide Objektive dicht nebeneinander angeordnet sein. Es ist dann zwar ein größerer Rechenaufwand erforderlich, jedoch werden gleichzeitig Glanzlichtprobleme vermieden, da der Winkel zwischen der Beleuchtungsrichtung und den beiden Beobachtungsrichtungen annähernd gleich ist.

In einer einfachen Variante enthält der Projektor ein Ronchigitter. Die Streifenmuster können jedoch auch interferometrisch erzeugt sein.

Der bei der Auswertung notwendige Rechenaufwand ist dann besonders gering, wenn die meßobjektseitigen Hauptpunkte der Objektive in einer Ebenen liegen und das Projektionsgitter und die Sensorflächen der Kameras in dazu parallelen Ebenen.

Bei einem anderen Ausführungsbeispiel schneiden sich die optischen Achsen in einem Punkt ungefähr in der Mitte des Meßvolumens. Man kann dann handelsübliche Videokameras verwenden, bei denen die optische Achse des Objektivs das Kameratarget etwa in der Mitte schneidet. Allerdings muß man dann die vollständige

Formel aus Applied Optics, Vol. 16 S. 2152(1977) heranziehen.

Im folgenden werden Einzelheiten der Erfindung anhand der Figuren erläutert. Es zeigt

Fig. 1 den schematischen Aufbau eines ersten Ausführungsbeispiels,

Fig. 2a und b Diagramme mit den Flächen gleicher Schwebungsphase für zwei unterschiedlich weit vom Projektor angeordnete Kameras für die Gerätegeometrie nach Fig. 1,

Fig. 3a und b Prinzipbild mit Erläuterung zum rechnerischen Vorgehen bei der Kombination beider Phasen,

Fig. 4 eine perspektivische Darstellung des Geräts nach dem ersten Ausführungsbeispiel,

Fig. 5 prinzipielle Anordnung eines zweiten Ausführungsbeispiels.

Die Meßvorrichtung in Fig. 1 hat einen Streifenprojektor mit einem Projektionsobjektiv (0) sowie zwei Kameras, von denen hier lediglich die Objektive (1, 2) und die Sensorflächen (K_1, K_2) dargestellt sind. Um die Sprechweise zu vereinfachen, verwendet man für das Projektionsgitter und die Kamerachips den Oberbegriff "Projektionsebenen" und indiziert sie mit 0 = Projektor, 1 und 2 (Kameras). Zu den weiteren Erklärungen verwendet man das eingezeichnete Koordinatensystem: Die Meßobjektseitigen Hauptpunkte der drei Objektive (0, 1, 2) liegen in der Ebene $Z=0$. Ihre Koordinaten sind (0,0,0) (Projektor), ($x_{pi}, y_{pi}, 0$) ($i = 1, 2$ Kameras). Den Haupteffekt bewirken die Abstände x_{pi} , also diejenige Richtungskomponente quer zu den Gitterlinien in der Gitterebene. Parallel zur Z-Ebenen sind das Projektionsgitter (G) und die Kamerachips (K_1, K_2) so angebracht, daß alle drei Öffnungskegel das Meßvolumen überdecken. Das Objekt (Obj) liegt im Meßvolumen. Die Abstände der Projektionsebenen vom hinteren (= dem Meßobjekt abgewandten) Hauptpunkt ist $-a_i$. In den Zeichnungen sind die Objektive der Einfachheit halber mit zusammenfallenden Hauptpunkten dargestellt und auch die Berechnungen entsprechend ausgeführt. Wenn man Objektive mit Hauptpunkt Abstand ungleich Null verwendet, muß man die entsprechende Projektionsebene um den Hauptpunkt Abstand verschoben anbringen und auch die laterale Verschiebung durch die hinteren Hauptpunkte berücksichtigen. Die Streifen verlaufen in Y-Richtung, also senkrecht zur Zeichnungsebene, ebenso verhält es sich mit den Spalten der Kamera. Auf den Projektionsebenen verwendet man lokale Koordinaten (x_i, y_i) $i=0 \dots 2$ (ohne tiefgestelltes i), deren Nullpunkte bei ($x_{pi}, y_{pi}, -a_i$) im Gerätekoordinatensystem liegt. Der Streifenabstand auf dem Projektionsgitter sei g_0 , der Spaltenabstand der Kameras sei g_1 und g_2 . Zur Vereinfachung nimmt man an, daß bei der Ursprungsordinate des lokalen Koordinatensystems jeweils die Streifenphase Null ist. In der Fig. 1 ist die Meßvorrichtung in der XZ-Ebene, in der alle Y-Koordinaten Null sind, dargestellt. Wie die folgenden Betrachtungen zeigen, lassen sich auch Objektkoordinaten $x \neq 0$ messen.

Man wähle einen Punkt $[x, y, z]$ im Meßvolumen. Sein Bild auf dem Projektionsgitter liegt bei

$$[x_0, y_0] = [-a_0 \cdot x/z, -a_0 \cdot y/z]$$

und sein Bild auf den Kameras bei

$$[x_i, y_i] = [-a_i \cdot (x - x_{pi})/z, -a_i \cdot (y - y_{pi})/z]$$

Für die Differenzen $x_0 - (a_0/a_i) \cdot x_i$ gilt:

$$x_0 - (a_0/a_i) \cdot x_i = -a_0 \cdot x/z + (a_0 \cdot a_i/a_i) \cdot (x - x_{pi})/z = -a_0 \cdot x_{pi}/z$$

Die Differenzen hängen bei der gewählten Anordnung der Projektoren und Kameras nur von z und nicht von x und y ab. Der Minuend setzt sich zusammen aus der beobachteten Streifenphase und der Streifenordnung, der Subtrahend ist der auf das Projektionsgitter umskalierte Spaltenabstand des Kamerapixels von der zugehörigen Nullage x_{pi} .

Man kann die Differenzen darstellen als

$$x_0 - (a_0/a_i) \cdot x_i = (n_i + d_i) \cdot g_0$$

mit $0 \leq d_i < 1$

$x_0 - (a_0/a_i) \cdot x_i$ heißt ab hier die Phasendifferenz und d_i die Schwebungsphase zwischen dem Projektor und der i-ten Kamera. Im Unterschied dazu nennt man den nicht ganzzahligen Teil $\text{Fract}(x_0/g_0)$ die Streifenphase, sie ist das primäre Ergebnis der Phasenmessung. Wenn man die rechten Seiten der letzten beiden Gleichungen gleichsetzt, sieht man:

$$(n_i + d_i) \cdot g_0 = -a_0 \cdot x_{pi}/z$$

oder

$$z = -a_0 \cdot x_{pi}/(g_0 \cdot (n_i + d_i))$$

Mit der Messung der Streifenphase und Berücksichtigung der Pixelkoordinate kann man nur d_1 und d_2 bestimmen. Wenn man x_{p1} entsprechend klein wählt, ändert sich d_1 über das ganze Meßvolumen nur von 0 nach 1, d. h. der Bereich erstreckt sich von

$$z_v = -a_0 \cdot x_{p1}/(g_0 \cdot n_1) \text{ bis } z_h = -a_0 \cdot x_{p1}/(g_0 \cdot (n_1 - 1)).$$

(Fig. 2a zeigt diesen Sachverhalt für den Projektor (0, P) und die in X-Richtung nahe dabei liegende Kamera (1, B₁). Die fächerartigen Linien sind die Sichtlinien des Projektionsgitters bzw. die Sichtlinien eines fiktiven Gitters mit $a_0/g_0 = a_1/g_1$ auf der Kamera. Die waagerechten Linien zeigen die Orte gleicher Phasendifferenz mit den Ordnungen $n_1 = 2$ entsprechend dem hinteren Ende (z_h) des Meßvolumens und $n_1 = 3$ für das vordere Ende (z_v). Die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die Z-Ebene mit $d_1 = 0.5$.

Mit $a_1 = a_2 = a_0$ kann man aus der oben dargestellten Beziehung leicht herleiten, daß

$$(x_0 - x_2) = (x_{p2}/x_{p1}) \cdot (x_0 - x_1)$$

ist. Fig. 2b zeigt diesen Sachverhalt für den Projektor (0, P) und Kamera (2, B₂). Weil dort $x_{p2} = 5 \cdot x_{p1}$ ist, sieht man dort zwischen z_v und z_h 5 kurze Ordnungen, wo die lange Schwebung eine Ordnung durchläuft. Waagerecht eingezeichnet sind die Linien gleicher Phasendifferenz für $n_2 = 10$ (entsprechend z_h) bis $n_2 = 15$ (entsprechend z_v). Wegen

$$(x_0 - x_2) = (n_2 + d_2) \cdot g$$

ist

$$n_2 = \text{int}((x_0 - x_2)/g - d_2) = \text{int}((x_{p2}/x_{p1}) \cdot (x_0 - x_1)/g - d_2) = \text{int}((x_{p2}/x_{p1}) \cdot (n_1 + d_1) - d_2)$$

Diese Beziehung liefert die Ordnung n_2 der kurzen Schwebung aus dem Meßwert d_1 , ohne zuvor z berechnen zu müssen. Zugleich enthält sie das Rezept, wie x_{p2} zu dimensionieren ist, um Eindeutigkeit im Meßvolumen zu gewährleisten: Wenn alle Streifenphasen mit der Genauigkeit d ermittelt werden, wählt man x_{p2} so, daß $(x_{p2}/x_{p1}) < (1/d)$ ist. Mit n_2 kann man nun z bestimmen:

$$z = -a_0 \cdot x_{p2}/((n_2 + d_2) \cdot g)$$

Fig. 3a und 3b zeigen, wie man für ein Pixel auf Kamera (1) in Fig. 1 mit lokaler Koordinate x_1 einen zugehörigen Objektpunkt ermittelt: Auf der Sichtlinie des Pixels sind einige der 10 groben Lagen zwischen z_v und z_h eingezeichnet, die mit der ersten Kamera unterscheidbar sind, wenn man annimmt, daß die Phasenbestimmung auf 1/10 Streifen genau arbeitet. Bei denjenigen Diskretisierungsschritten, bei denen sich die Ordnung der kurzen Schwebung ändert, ist dies ebenfalls vermerkt ($n_2 = 12 \dots 14$). Eingezeichnet ist ein Stück der zu vermessenden Objektkontur (Obj) und zwei von den Pixeln x_{n1} und x_{n2} auf Kamera (2) ausgehenden Sichtlinien. Man beginnt an der Stelle, an der die bei x_1 ausgehende Linie das Objekt schneidet. Da man die Phase der langen Schwebung nur in diskreten Stufen bestimmt, beispielsweise in 8-Bit, mißt man statt des angegebenen Punkts eine etwas zu große Z-Koordinate — man erkennt also den durch den Pfeil (A1) gekennzeichneten Punkt. Im gezeichneten Beispiel führt gerade keine Pixel-Sichtlinie der zweiten Kamera dort hin. Man berechnet die Lage des zugehörigen Punkts auf Kamera 2 und gelangt über die gestrichelte Sichtlinie zu einem Punkt (x_2, y_2) zwischen den Kamerapixeln (in Fig. 3a nur als x_2 dargestellt). Wenn $y_{p1} \neq y_{p2}$ ist, liegt der Punkt i. a. sowohl zwischen den Zeilen als auch zwischen den Spalten. Die Pfeile (A2) führen zu den Nachbarpunkten (x_{n1}, y_{n1}), (x_{n2}, y_{n2}) und (x_{n3}, y_{n3}) in Fig. 3b. Aus diesen Punkten und den dort vorliegenden Phasen berechnet man die Phase am Interpolationspunkt. Man sieht in Fig. 3b die Kamerapixel und die bereits um Ordnungssprünge bereinigten Phasenmeßwerte (p_{n1}, p_{n2}, p_{n3}) sowie den interpolierten Wert (p). Der Pfeil (A3) zeigt die Phasenbestimmung an dem Punkt, den die Kamera an der Stelle (x_2, y_2) sehen würde, wenn dort ein Pixel wäre.

Bevor man die Interpolation ausführt, muß gleich Ordnungssprünge zwischen den Meßpunkten der Nachbarschaft ausgleichen, z. B. mit der logischen Abfolge folgendes Programmstücks:

```
IF (pn1 < (1/2)) THEN
  IF ((pn2 ≥ (1/2) AND (pn2 - pn1) ≥ (1/2)) THEN
    pn2 = pn2 - 1;
  END;
  IF ((pn3 ≥ (1/2) AND (pn3 - pn1) ≥ (1/2)) THEN
    pn3 = pn3 - 1;
  END;
  ELSE
    IF ((pn2 < (1/2) AND (pn1 - pn2) ≥ (1/2)) THEN
      pn2 = pn2 + 1;
    END;
    IF ((pn3 < (1/2) AND (pn1 - pn3) ≥ (1/2)) THEN
      pn3 = pn3 + 1;
    END;
  END;
```

Mit dem so modifizierten $pn1 \dots pn3$ berechnet man die linear interpolierte Phase:

$$d_2 = (x_2 \cdot [(pn2 - pn3)yn1 + (pn3 - pn1)yn2 + (pn1 - pn2)yn3] - yn \cdot [(pn2 - pn3)xn1 + (pn3 - pn1)xn2 + (pn1 - pn2)xn3] + (pn3 \cdot xn2 - pn2 \cdot xn3)yn1 + (pn1 \cdot xn3 - pn3 \cdot xn1)yn2 + (pn2 \cdot xn1 - pn1 \cdot xn2)yn3)/$$

$$((x_2 - x_3)y_{n1} + (x_3 - x_1)y_{n2} + (x_1 - x_2)y_{n3});$$

Wenn bei der Interpolation ein negatives d_2 herauskommt, ist die Ordnung am Interpolationspunkt niedriger als am Punkt (x_1, y_1) . Da man mit $(n_2 + d_2)$ weiterrechnet, kommt auch bei negativem d_2 der richtige Z-Wert heraus.

Statt über drei Nachbarpunkte kann man auch über die vier Nachbarpunkte interpolieren. Dabei muß man den Phasenmeßwert pn_4 zuerst wie oben sprungstellenbereinigen. Dann berechnet man:

$$\begin{aligned} d_2 = & (x_2 \cdot y \cdot [pn_2 - pn_1 + pn_3 - pn_4] \\ & + x_2 \cdot [(pn_4 - pn_2)y_{n1} + (pn_1 - pn_3)y_{n2}] \\ & + y_2 \cdot [(pn_4 - pn_2)x_{n1} + (pn_1 - pn_3)x_{n2}] \\ & + (pn_4 \cdot x_{n1} + pn_2 \cdot x_{n2})y_{n1} + (pn_3 \cdot x_{n1} - pn_1 \cdot x_{n2})y_{n2} / \\ & ((x_2 - x_1) \cdot (y_{n1} - y_{n2})) \end{aligned}$$

Bei der Anordnung nach Fig. 1 kann man auch über eine weitere Betrachtung zu den Objektkoordinaten (y, y, z) gelangen. Man hat eigentlich zwei kurze Schwebungen:

1. zwischen dem Projektor und Kamera 2,
2. zwischen beiden Kameras.

Die Schwebung zwischen beiden Kameras kann man auch so auffassen: Auf Kamera 1 haben wir bei (x_1, y_1) die Streifenphase $p_1(x_1, y_1)$. Der Punkt (x_2, y_2) auf Kamera 2 liegt i. a. zwischen den Pixeln, es liegen nur Messungen an den Nachbarpixeln vor. Da es sich dabei um den gleichen Punkt auf dem Objekt handelt und dasselbe Muster beobachtet wird, liegt dort auch die gleiche Streifenphase vor. Mit Hilfe der Streifenphasen an den Nachbarpixeln unter Berücksichtigung möglicher Ordnungssprünge berechnet man die X-Koordinate (ix_2, y_2) auf Kamera 2, bei der die interpolierte Streifenphase mit der auf Kamera 1 gemessenen übereinstimmt. Die Lage $<x, y, z>$ ergibt sich dann aus (x_1, y_1) und ix_2 und der Lage der Kameras zueinander. Auf diese Weise ist die Z-Koordinate des Punkts bestimmt, den (x_1, y_1) sieht — Pfeil (A4) in Fig. 3a. Damit diese Vorgehensweise praktikabel wird, darf sich die Streifenphase von Kamerapixel zu Kamerapixel um weniger als eine Ordnung ändern.

Dieses Auswerteverfahren ist besonders günstig, wenn das Gitter mehrfach senkrecht zu den Gitterlinien verschoben wird. Verschiebt man das Gitter nicht exakt in der Gitterebene, so beeinflusst das hier zwar die lange Schwebung, nicht aber die kurze, die die endgültige Lage liefert. Daher sind bei der Lagerung des Gitters größere Toleranzen zulässig.

In Fig. 4 ist das Ausführungsbeispiel nach Fig. 1 detaillierter dargestellt. Eingezeichnet sind das Projektionsobjektiv (0) und die Kameraobjektive (1, 2). Die Linien des Gitters (G) verlaufen in Y-Richtung. Die Objektive (0, 1, 2) sind an einem Träger (14) aus einem Material mit geringer Wärmedehnung (z. B. Zerodur oder Invar) befestigt. Der gleiche Träger (14) dient auch als Abstandshalter für die Kamerachips und die Parallelgrammführung (7), die das Gitter (G) in seiner Ebenen verschiebbar lagert.

Das Gitter (G) wird in kontrollierter Weise über die schrittmotorgesteuerte Mikrometerschraube (8) angetrieben. Der Schrittmotor (9) an der Mikrometerschraube wird vom Computer (10) gesteuert. Die Kamerachips (K_1, K_2) sind über entsprechende Interfaces mit der ebenfalls im Computer (10) untergebrachten Bildverarbeitung (11) verbunden. Die Phasenmessung erfolgt beispielsweise mit dem bekannten 4-Punkte-Algorithmus mit Phasenschieben und liefert die Restphasen in ganzen Vielfachen von $1/256$. Die übrige Auswertung folgt dem oben beschriebenen Weg. Die Meßergebnisse werden anschließend auf einem Plotter (12) oder einem Videomonitor (13) dargestellt.

Fig. 5 zeigt eine Anordnung bestehend aus dem Projektor (P1) mit dem Ronchigitter (G) und den beiden Beobachtungskameras (B3, B4) mit den zugehörigen Kamerachips (K_3, K_4). Der Projektor enthält eine Schlitzblende, die dafür sorgt, daß der Intensitätsverlauf des projizierten Gitterbildes in etwa sinusartig ist. Die meßobjektseitigen Hauptpunkte liegen auf der X-Achse in der Zeichenebene. Der Nullpunkt der X-Achse liege im Hauptpunkt von (P1). Um die Zeichnung nicht zu überladen, sind die Objektive wieder nur mit einem Hauptpunkt gezeichnet. Die strichpunktierten optischen Achsen sind so ausgerichtet, daß sie sich im Punkt M in der Mitte des Meßvolumens schneiden. In diesem Fall steht das Projektionsgitter senkrecht auf der optischen Achse des Projektors. Die Kamerachips stehen senkrecht auf den zugehörigen optischen Achsen. Deshalb braucht man den Kamerachip nicht verschoben anzubringen, sondern verwendet die übliche Anordnung, bei der die optische Achse den Chip etwa in der Mitte trifft. Die Linien des Gitters (G) verlaufen senkrecht zur Zeichenebene, ebenso verhält es sich mit den Spalten der Kamerachips. Bei dieser Anordnung hat man die geringsten Probleme mit Verzeichnung der Objektive, allerdings sind die Flächen gleicher Schwebungsphase keine Ebenen mehr in Z-Richtung, sondern senkrecht zur Zeichenebene zylinderähnliche Flächen über den punktierten Kurven. Die punktierten Kurven sind hier nicht maßstäblich dargestellt, sondern in viel größerem Abstand, als sie in Wirklichkeit verlaufen. An der mit (W) bezeichneten weitpunktierten Kurve ist die Schwebungsphase zwischen Projektor und Kamera (B4) und über der mit (E) bezeichneten engpunktierten Kurve ist die Schwebungsphase zwischen Projektor und Kamera (B3) jeweils gerade eine Periode, das heißt, die Schwebungsphase hat den Wert Eins. Diese Kurven werden durch die Formeln 4 von Idesawa et al., Scanning moire method and automatic measurement of 3-D shapes, Appl. Optics Vol. 16, No. 8 (1977), 2152–2162 beschrieben. Weil (B4) weiter von (P1) entfernt ist als (B3), liegen die engpunktierten Flächen dichter beieinander als die weitpunktierten. Diese Tatsache ermöglicht es, aus Phasenmessungen mit (B3) und (B4) einen Bereich über mehrere solcher Flächen in der Z-Richtung eindeutig zu überdecken. Mit (B4) alleine könnte man in einer Tiefe

eindeutig messen, der dem Abstand zweier benachbarter engpunktierter Kurven entspricht.

Zur Auswertung der Meßwerte berechnet man aus der Streifenphase p_1 b im Kamerapixel $[x_1, y_1]$ auf (B4) die Schwebungsphase durch

$$\text{mod}(p_1 - (a_0/g_0 \cdot a_1))x_1, 1).$$

Die Bezeichnung der Koordinaten und der geometrischen Abstände sowie der Gitterperiode entspricht derjenigen in Fig. 1. Um die mehrdeutigen z'_k zu berechnen, verwendet man die Idesawasche Formel, dabei ist k die jeweilige Ordnung. Zu z'_k berechnet man x'_k und y'_k . Bei der Berechnung der $[x_2, y_2]$ aus $[x'_k, y'_k, z'_k]$ muß man ebenfalls die Orientierung der Kamerachips zueinander berücksichtigen. Nun interpoliert man anhand der Nachbarnpixel von $[x_2, y_2]$ die Streifenphase p_2 bei $[x_2, y_2]$. Dasjenige k , für das der Betrag von $(p_2 - p_1)$ minimal ist, ist die richtige Ordnung. Das zugehörige $[x'_k, y'_k, z'_k]$ ist die Koordinate des Punkts, den $[x_1, y_1]$ auf (B4) sieht.

Das Ausführungsbeispiel nach Fig. 5 benutzt die lange Schwebung zwischen zwei eng in X-Richtung beieinanderstehenden Kameras um die grobe Lage zu ermitteln und eine der kurzen Schwebungen zwischen einer der Kameras und dem weit entfernten Projektor für die Feinbestimmung. Dies hat den Vorteil, daß für beide Beobachtungsrichtungen ähnliche Beleuchtungsverhältnisse bestehen. Wenn das zu vermessende Teil glänzt, kann man es vor der Messung so drehen, daß die Glanzlichter nicht mehr stören.

Um diesen Vorteil zu erlangen kann man wegen des kleinen geforderten Versatzes in X-Richtung einen Versatz in Y-Richtung hinnehmen, damit sich die Kameraobjektive nicht im Weg stehen. In diesem Falle ist es aber sinnvoll, die Kamerachips parallel auszurichten, damit der Rechenaufwand klein bleibt. Bei Versatz in Y-Richtung haben aber die Pixel auf Kamera 2 im allgemeinen eine andere Y-Position als auf Kamera 1, der Zusammenhang ist genau wie für die X-Richtung Z-abhängig. Bei der Suche nach passenden Lösungskombinationen braucht man die Berechnung nur über eine kleine Nachbarschaft und auch nur in Y-Richtung auszuführen.

Bei der praktischen Durchführung des Verfahrens sollte man Justagefehler der Meßvorrichtung berücksichtigen. Außerdem ist es eine unnötige Einschränkung, am vorderen und hinteren Ende des Meßvolumens genau eine ganze Schwebungsordnung haben zu wollen. Man führt eine Referenzmessung aus und mißt dabei Referenzphasen r_1 und r_2 . Um die Berechnungen einfach zu halten, führt man die Messung zweckmäßigerweise an einer senkrecht zur Z-Achse des Geräts aufgestellten Ebenen im Abstand z_r aus. Es bezeichne p ($0 \leq p < 1$) die gemessenen Streifenphase und man berechnet die n -te Lösung z_n als

$$z_n = -a_0 \cdot x_p / (s + g_0 \cdot (n + \text{mod}(p - r, 1))).$$

Dabei ist $r = r_1$ oder r_2 , $x_p = x_{p_1}$ oder x_{p_2} und s die zugehörige Sollphase einschließlich Ordnung bei z_r , der Index zeigt an, für welche Kamera (1, 2) man die Berechnungen durchführt. Wie man der Formel ansieht, ist der Term $\text{mod}(p - r, 1)$ in der Referenzstellung Null, man reproduziert für $n = 0$ die richtige Z-Lage.

Das hier beschriebene Verfahren funktioniert nicht nur bei paralleler Ausrichtung der Kamerachips und des Projektionsgitters, es ist so in seiner Wirkungsweise nur einfacher zu verstehen. Zunächst ist es nicht zwingend, die Kameras mit ihren Spalten parallel zu den Gittern auszurichten. Nach Drehung der Kameras um 90 Grad kann man auch die Zeilen als Gitter ansehen und wie gehabt vorgehen. Für manche Phasenmeßalgorithmen ist es vorteilhaft, die 45-Grad-Richtung oder eine andere festgelegte Richtung auf den Kamerachips als Streifenrichtung vorliegen zu haben. Nach entsprechender Koordinatentransformation funktioniert das Verfahren genauso.

Offensichtlich kann man das hier beschriebene zweistufige Verfahren durch Hinzufügen von Kameras an geeigneten Stellen zu einem mehrstufigen Verfahren erweitern. Ebenso kann man durch weitere Kameras andere Perspektiven des Meßobjekts aufnehmen und vermessen.

Das anhand der Figuren für Zentralprojektion ausgeführte Verfahren ist sinngemäß auch bei Parallelprojektion anwendbar. Die Rolle der Objektivabstände spielen dort die Projektionsrichtungen (Winkel zwischen den optischen Achsen).

Patentansprüche

1. Verfahren zur dreidimensionalen optischen Vermessung von Objektoberflächen, bei dem ein Projektor (G) ein Streifenmuster auf die Objektoberfläche projiziert und dasselbe aufprojizierte Streifenmuster mit zwei Videokameras (K_1, K_2, K_3, K_4) aufgezeichnet wird und in einem den Videokameras nachgeschalteten Auswerterechner die Topografie der Objektoberfläche berechnet wird, dadurch gekennzeichnet, daß aus den Kamerabildern jeder Kamera (K_1, K_2, K_3, K_4) getrennt voneinander die Streifenphase der aufgezeichneten Muster berechnet wird und aus der Kombination der berechneten Streifenphasen beider Kameras Objektkoordinaten (Op) berechnet werden, die innerhalb eines großen Meßbereiches eindeutig sind.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Kombination der Streifenphasen, ausgehend von der Streifenphase in einem Bildpunkt der ersten Kamera (K_1, K_4), die Menge möglicher Lösungskoordinaten innerhalb des Meßvolumens bestimmt wird und anhand dieser Lösungskoordinaten die zugehörigen Bildpunkte auf der zweiten Kamera (K_2, K_3) bestimmt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Streifenphasen in den Bildpunkten der zweiten Kamera durch Interpolation der Streifenphasen in benachbarten Kamerapixeln berechnet werden.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß vor der Interpolation mögliche Ordnungssprünge in den benachbarten Bildpunkten berücksichtigt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Differenzen zwischen den

Streifenphasen in dem zu den Lösungskoodinaten zugehörigen Bildpunkten der zweiten Kamera (K_2, K_3) und der Streifenphase im zugehörigen Bildpunkt der ersten Kamera (K_1, K_4) berechnet wird und derjenige Bildpunkt der zweiten Kamera ausgewählt wird, für den die Differenz minimal ist und daß aus der Streifenphase im ausgewählten Bildpunkt die Koordinaten (Op) der Objektoberfläche (Obj) berechnet wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß aus den Streifenphasen in den zu den Lösungskoodinaten zugehörigen Bildpunkten auf der zweiten Kamera (K_2, K_3) zugehörige zweite Lösungskoodinaten berechnet werden und daß diejenige zweite Lösungskoodinate ausgewählt wird, die den betragsmäßig kleinsten Abstand zu einer der ersten Lösungskoodinaten hat, wobei die ausgewählte Lösungskoodinate die Koordinate (Op) auf der Objektoberfläche (Obj) dargestellt.

7. Vorrichtung zur dreidimensionalen optischen Vermessung von Objektoberflächen, mit einem Streifenprojektor zur Projektion eines Streifenmusters auf die Objektoberfläche, mindestens einer ersten und zweiten Videokamera zur Aufnahme von Videobildern desselben auf die Objektoberfläche projizierten Streifenmusters und einem den Videokameras nachgeschalteten Auswerterechner zur Berechnung der Topografie der Objektoberfläche, dadurch gekennzeichnet, daß die Optik (1) einer ersten Kamera (K_1) in einem Abstand von der Optik (0) des Projektors angeordnet ist, der wesentlich kleiner ist, als der Abstand der Optik der zweiten Kamera (K_2) von der Optik (0) des Projektors.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand der Optik (1) der ersten Kamera (K_1) von der Projektionsoptik (O) so gewählt ist, daß die aus den mit der ersten Kamera (K_1) aufgezeichneten Streifenmustern berechneten Streifenphasen für alle Objektkoodinaten (Op) innerhalb eines vorgegebenen Meßvolumens eindeutige grobe Lösungen liefern und daß der Abstand der zweiten Kamera (K_2) von der Projektionsoptik (0) so gewählt ist, daß die zu den Videobildern der zweiten Kamera (K_2) gehörenden Streifenordnungen eindeutig aus den Videobildern der ersten Kamera (K_1) berechnet sind.

9. Vorrichtung zur dreidimensionalen optischen Vermessung von Objektoberflächen, mit einem Streifenprojektor zur Projektion eines Streifenmusters auf die Objektoberfläche, mindestens einer ersten und zweiten Videokamera zur Aufnahme von Videobildern desselben auf die Objektoberfläche projizierten Streifenmusters und einem den Videokameras nachgeschalteten Auswerterechner zur Berechnung der Topografie der Objektoberfläche, dadurch gekennzeichnet, daß die Optiken (B_3, B_4) der beiden Videokameras (K_3, K_4) in unterschiedlichen Abständen von der Optik (P_1) des Projektors angeordnet sind und die Differenz der Abstände der Kameraoptiken (B_3, B_4) von der Projektoroptik (P_1) betragsmäßig wesentlich kleiner ist als jeder der Abstände.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß beide Kameraoptiken (B_3, B_4) dicht nebeneinander angeordnet sind.

11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß der Projektor ein Projektionsgitter (G) enthält und die Sensorflächen (K_1, K_2) der Kamera in einer gemeinsamen Ebene angeordnet sind.

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die dem Meßobjekt (Obj) zugewandten Hauptpunkte (P, B_1, B_2) der Kameraobjektive (1, 2) und des Projektionsobjektivs (0) in einer zweiten Ebene angeordnet sind.

13. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die zweite Ebene parallel zu derjenigen Ebene ist, in der das Projektionsgitter (G) und die Sensorflächen (K_1, K_2) der Kameras angeordnet sind.

14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß der Projektor (G) und die Kameras (K_3, K_4) so zueinander angeordnet sind, daß sich die optischen Achsen der Kameraoptiken (B_3, B_4) und die optische Achse der Projektionsoptik (P_1) in einem Punkt (M) schneiden.

15. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß das Gitter (G) senkrecht zur optischen Achse der Projektionsoptik (P_1) und die Kamerasensoren (K_3, K_4) senkrecht zu den optischen Achsen der Kameraoptiken (B_3, B_4) angeordnet sind.

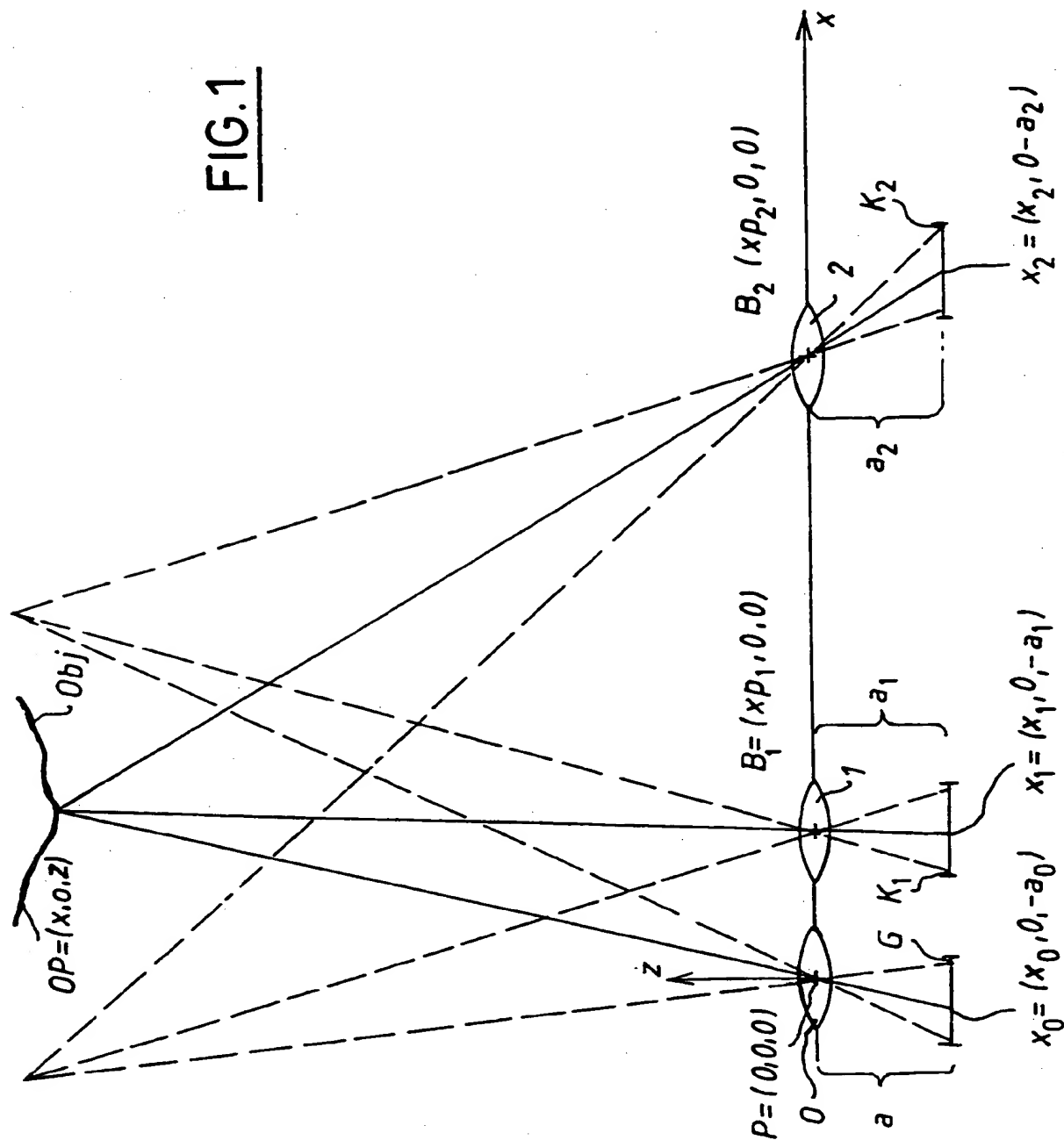
16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß das aufprojizierte Muster helle und dunkle Streifen gleicher Breite aufweist.

17. Vorrichtung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß das Helligkeitsmuster einen sinusförmigen Intensitätsverlauf quer zur Streifenrichtung hat.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

FIG.1



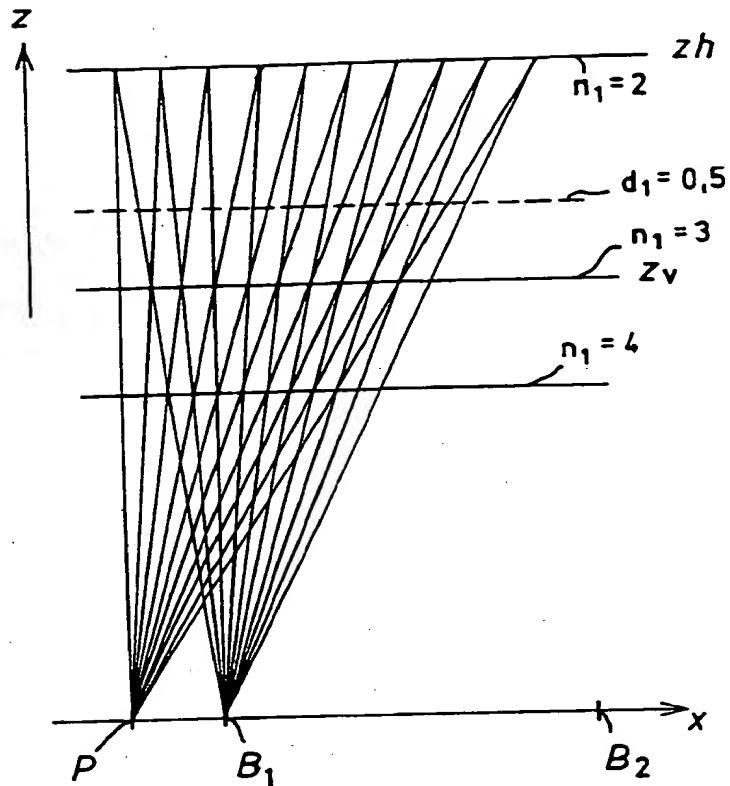


FIG. 2a

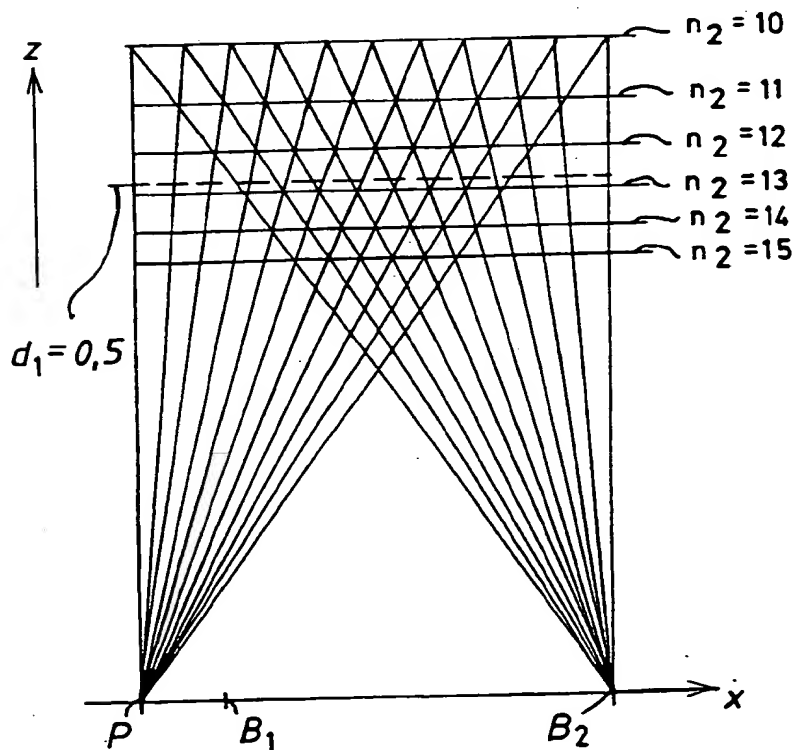


FIG. 2b

FIG. 4

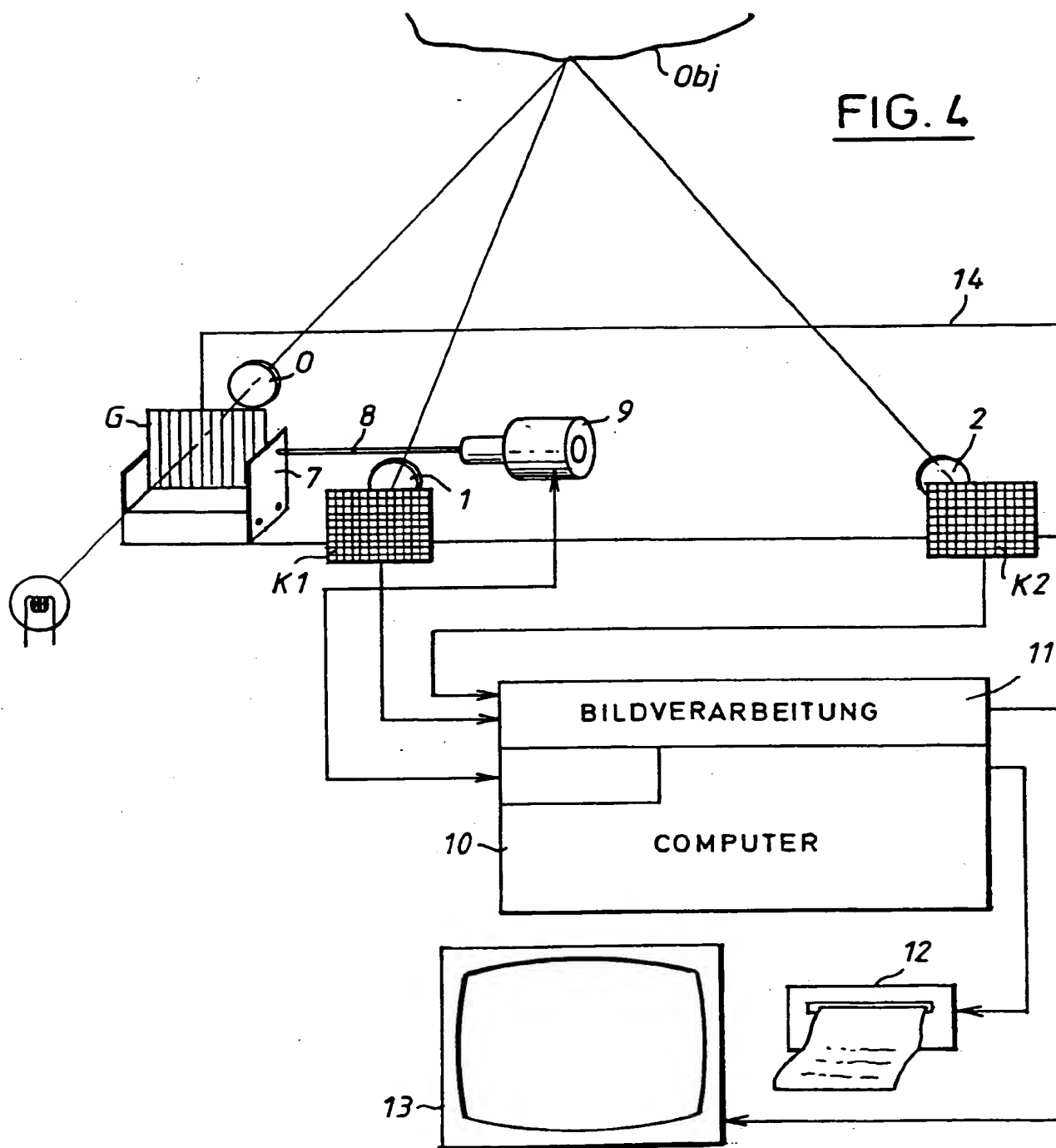


FIG. 5

